

丁坝周围水流紊动特性与地形冲刷的关系*

苏伟¹, 王平义², 胡宝月¹

(1. 河北农业大学, 河北保定 071001; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 通过动床冲刷试验对不同形式丁坝的水流紊动特性进行对比分析, 结合河床冲刷地形等值线图, 找出水流紊动特性与河床冲刷之间的关系。在此基础上, 深入分析不同形式丁坝对水流紊动特性的影响, 优选出新型坝体结构形式。试验结果表明: 丁坝周围地形的冲刷与水流紊动的强烈程度有关, 冲刷坑的深度随水流紊动特性的变化有先增大后减小的趋势; 沙垄主要由粗砂组成, 且断面形状呈“流线型”, 回流区出现细砂覆盖层; 圆弧断面和勾头形式丁坝在减弱水流紊动方面具有一定的优势。

关键词: 丁坝; 紊动特性; 地形; 关系

中图分类号: U 671.9⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0129-07

Relationship between terrain erosion and flow turbulence characteristics around spur dike

SU Wei¹, WANG Ping-yi², HU Bao-yue¹

(1. Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the comparative analysis of dynamic characteristics of different types of spur dikes through moving bed scouring experiment, and combining with the riverbed scouring terrain contours, we find the relationship between the turbulence characteristics and bed scour. On this basis, we carry out an in-depth analysis of the impact of different types of dikes on the dynamic characteristics of turbulent flow, and optimize the structure of the new-type dam. Test results show that the erosion of terrain around the spur dike is associated with the intensity of turbulence flow, the depth of the scour pit increases first and decreases later along with the change of flow turbulence characteristics; the sand ridge is mainly composed of coarse sand, and the cross section is in the “streamlined” shape, the backflow zone appears fine sand layer, and the circular cross section and hook type of spur dike has a certain advantage in less flow turbulence.

Keywords: spur dike; turbulence; topography characteristics; relationship

丁坝是一种常见的航道整治建筑物, 在使用过程中, 会受到水流动力的作用, 产生水毁现象^[1]。调查研究发现, 在众多水毁形态中, 冲刷坑延伸至坝基导致坝体失稳的水毁现象占有非常大的比例, 这给河道整治工作增加了很大的难度, 同时也造成了很大的经济损失。在丁坝正常工作状态下, 会束窄河道、影响水流结构, 对水流有

明显的扰动影响, 而且丁坝附近的局部流态非常复杂, 呈现出强烈的三维紊动特性^[2-6], 这种紊动特性与地形冲刷有很强的关联性。

目前, 关于丁坝周围水流紊动特性的研究已有不少成果面世, 这些研究主要是针对水流紊动特性分布规律进行的, 其中具有代表性的有: 高桂景等^[7]认为坝长、流量及水深对丁坝附近水流

收稿日期: 2015-09-26

*基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目 (Z2015158)

作者简介: 苏伟 (1985—), 男, 硕士, 助教, 从事河道治理及泥沙动力学方面的研究。

紊动动能分布有影响；张华庆等^[8]对丁坝坝头附近水流和回流区水流的紊动特性进行了系统的观测和分析，得到了丁坝坝头和回流区的水流特性及紊动动能的分布规律；陈稚聪^[9]认为坝后回流区纵向紊动强度明显增强，且回流正流速区大于回流负流速区，主流区、回流正流速区和回流负流速区的3个流区纵向紊动强度均以对数形式沿程减弱，至回流结束一段距离后恢复到无丁坝状态。张可等^[10]得出丁坝附近水流紊动强度沿水流方向、水深方向和横向的分布规律，探讨了不同坝体挑角对丁坝附近水流紊动强度和脉动动能的影响。以上研究成果体现出了一个共同的特点——只针对水流紊动特性进行了研究，忽略了实际河道中水沙两相的复杂情境，而真实的河道冲刷恰恰是紊动水流与泥沙激烈作用引起的河床

泥沙运动。因此，前人虽已取得了很多成果，但在丁坝周围紊动水流如何影响冲刷坑地形的塑造方面研究成果较少。为了分析出水流紊动特性与地形冲刷的关系，把紊动水流和泥沙运动结合在一起进行深入研究很有必要。

本文通过模型试验，对丁坝水流紊动特性和地形冲刷特点进行了研究，分析总结了紊动水流作用下冲刷坑地形的演变过程。

1 建立模型

1.1 试验场地

试验在长30 m、宽2 m的矩形玻璃水槽中进行。进口流量由电磁流量系统控制，尾门由翻板门结合小水阀控制水位，流量自动控制系统如图1所示。

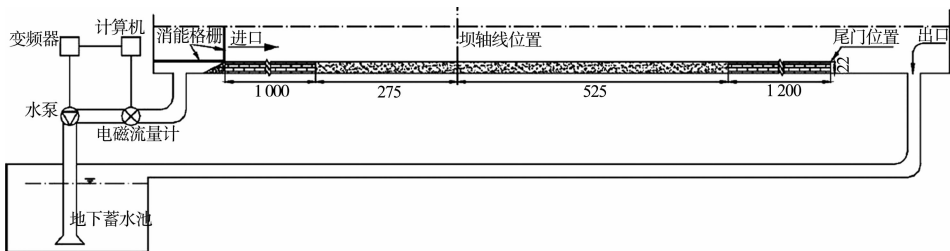


图1 流量自动控制系统 (单位: mm)

1.2 试验模型制作

为了便于测量试验数据和模拟观察地形冲刷变化，试验采用清水动床试验。综合考虑长江上游河段的平面尺寸以及丁坝结构尺寸，利用现有的科研条件，充分发挥2 m宽试验水槽和现有供水系统的作用，概化模型仅考虑模拟部分工程长度，采用平面比尺 $\lambda_l = 40$ 。概化模型设计为正态模式，水平比尺和垂直比尺分别为 $\lambda_l = \lambda_h = 40$ 。

原型丁坝的坝高为4 m，坝顶顶宽为3 m，按比尺换算得模型丁坝高为100 mm，坝顶宽为75 mm (表1)，丁坝面层厚度按垂直比尺换算，丁坝横断面采用圆弧断面(图2a)和梯形断面(图2b))，梯形断面迎水坡坡度为1:1.5，背水坡坡度为1:2，与原型丁坝坡度一致，坝体用0.006~0.012 m散抛石堆砌，丁坝周边护底的范围按水平比尺换算。

表1 丁坝几何尺寸组合

坝顶宽/m		坝高/m		挑角/(°)		块石粒径/m	
原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型
3	0.075	4	0.1	90	90	0.25~0.48	0.006~0.012

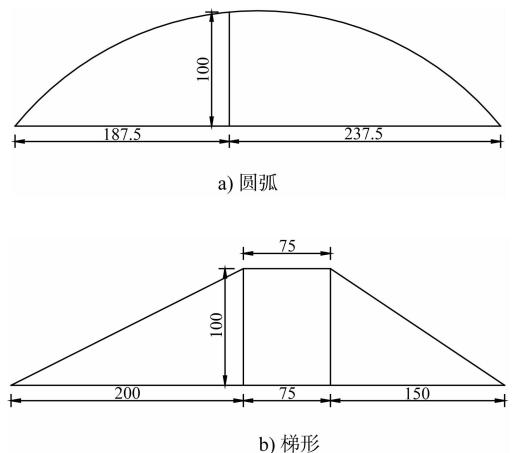


图2 坝身横断面 (单位: mm)

为了能够较好地模拟出丁坝周围床面的变形,选用 $\rho_s = 2\ 560\ \text{kg/m}^3$ 的石英砂作为模型沙,并假定:

采用模型沙比尺 $\lambda_d = \frac{d_p}{d_m} = 40$;

用铜鼓滩河段床沙级配 $d_s = 0.5\ \text{mm}$, $d_{50} = 50\ \text{mm}$, $d_{95} = 118\ \text{mm}$;

采用沙莫夫起动流速公式

$$U_c = 1.4 \sqrt{gd} \ln \frac{h}{7d} \quad (1)$$

计算得: $U_{op} = 2.717\ \text{m/s}$ 。

依据模型比尺计算后得到模型沙中值粒径 $d_m = 1.25\ \text{mm}$, 采用适用于无黏性模型沙起动流速的 B. H. 冈察洛夫(1954)不动流速公式

$$V_0 = 1.061g \frac{8.8h}{d_{95}} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)gd}{\rho}} \quad (2)$$

计算得: $V_{0m} = 0.426\ \text{m/s}$ 。

因此得: $\lambda_{v_0} = \frac{2.717}{0.426} = 6.378$, 与 $\lambda_v = 6.325$

相差不大, 认为基本满足泥沙起动相似条件。

根据定床 $Q = 95\ \text{L/s}$ 、 $H = 0.14\ \text{m}$ 实测流速资料, 坝体断面平均流速约为 $0.6\ \text{m/s}$, 大于泥沙起动流速, 因此认为选沙是基本合理的。

通过几次试验, 发现冲刷在较短时间内平衡, 河床表面粗化严重; 对比分析表明, 所选原型沙级配为长期冲刷过程中形成的粗化后的级配, 使冲刷坑及坝体破坏与原型相似性不大。因此, 在

铜鼓滩河段原型级配的基础上调整床沙级配, 中值粒径减小为 $d_{50} = 40\ \text{mm}$, 同时调整粗颗粒泥沙所占的百分比, 概化出长江上游天然河床床沙级配, 按模型沙比尺换算后得模型沙级配(图3)。通过试验发现, 冲刷效果与原型相似度较高。水槽底部平铺试验沙, 根据模型比尺换算, 试验沙平均厚 $0.1\ \text{m}$, 丁坝周围区域铺沙厚 $0.22\ \text{m}$, 在水槽的中部铺设了 $8.0\ \text{m}$ 长的动床段(图4)。

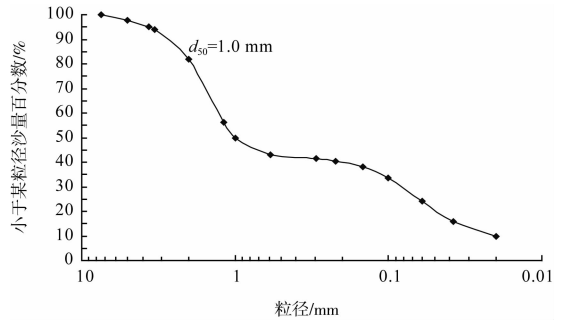


图3 概化非均匀床沙级配曲线

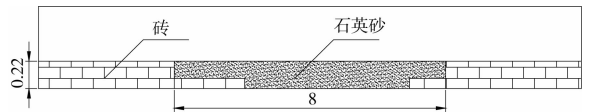


图4 动床试验模型布置(单位:m)

试验在顺直平底水槽中进行(图5), 在水槽中布置多个测点, 在丁坝附近测点布置加密, 丁坝坝型有直头丁坝(图6a))和勾头丁坝(图6b))两种形式, 不同断面和不同坝型丁坝进行组合3种方案(表2), 流量控制条件为来水流量 $Q = 95\ \text{L/s}$ 恒定流, 控制丁坝上游水深 $H = 0.14\ \text{m}$ 。

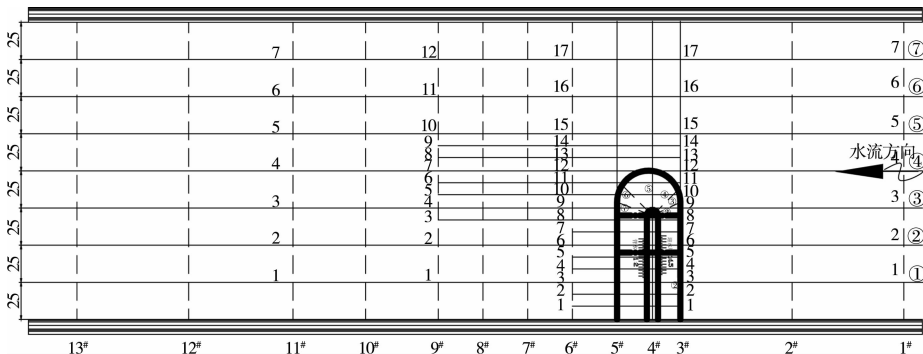


图5 丁坝布置位置

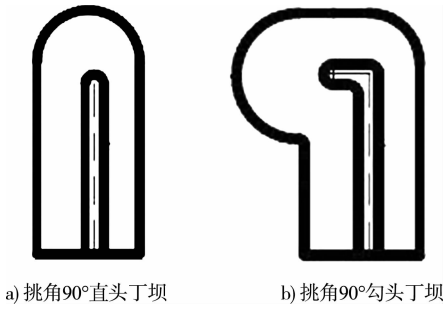


图6 丁坝坝型

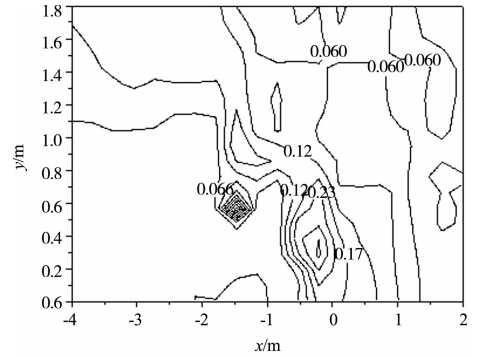
表2 清水冲刷试验工况组合

工况	坝长/m	挑角/(°)	坝型
M4	0.5	90	梯形断面圆弧直头丁坝
M5	0.5	90	圆弧断面圆弧直头丁坝
M6	0.5	90	梯形断面圆弧勾头丁坝

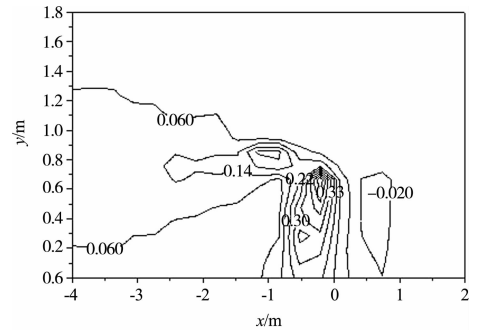
2 模型试验结果

2.1 不同断面形式丁坝对比

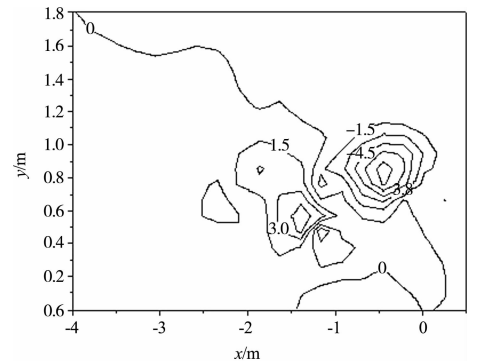
选取动床工况中的工况 M4 (50 cm 正挑梯形断面圆弧直头) 和工况 M5 (50 cm 正挑圆弧断面直头) 进行对比, 绘制与冲刷关系密切的 0.8 h 水深水流紊动强度、紊动动能和最终冲刷地形等值线图, 综合分析水流紊动强度和紊动动能与河床冲刷之间的关系, 图中横轴 0 点为模型丁坝坝轴线所在位置。试验数据分析成果见图 7。



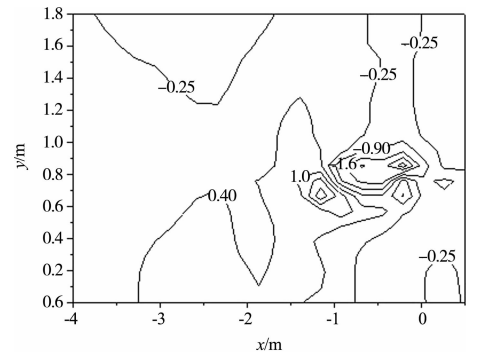
c) 工况M4紊动动能等值线



d) 工况M5紊动动能等值线



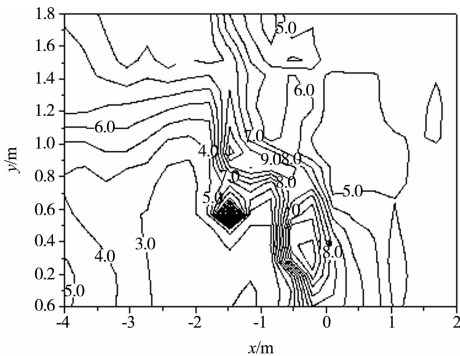
e) 工况M4冲刷地形等值线



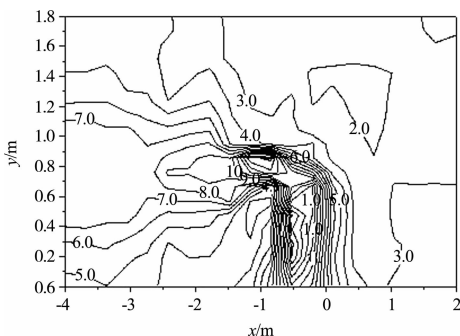
f) 工况M5冲刷地形等值线

图7 紊动强度、紊动动能与冲刷地形对比

由等值线图可以看出, 两种工况 (M4、M5) 的紊动强度等值线和紊动动能等值线在丁坝周围分布比较集中, 紊动强度和紊动动能值较大的区域



a) 工况M4紊动强度等值线



b) 工况M5紊动强度等值线

主要分布在丁坝坝头及丁坝下游的挑流区域,丁坝上游紊动强度和紊动动能数值较小。

从紊动强度等值线(图7a)、b))上可以观察到,工况M4坝轴线上的紊动强度 9.0 cm/s^2 ,工况M5坝轴线上的紊动强度 5.0 cm/s^2 ,对于丁坝周围区域,工况M4的紊动强度值都要高于工况M5;紊动动能等值线(图7c)、d))上显示,工况M5丁坝周围的紊动动能值略大于工况M4,紊动动能分布范围要小于工况M4;从冲刷地形等值线(图7e)、f))上可知,工况M4的最大冲刷深度为 4.5 cm ,沙垄的最大高度为 3.0 cm ,工况M5的最大冲刷深度 1.6 cm ,沙垄的最大高度为 1.0 cm 。

从紊动强度、紊动动能和冲刷地形图上看,紊动强度和紊动动能等值线密集的区域与冲刷坑深度等值线密集的区域基本重合。

丁坝坝头周围及挑流区域是紊动强度和紊动动能较大且较集中的区域,也是冲刷坑的发展区域。从图8可见,冲刷坑从坝头周围(环形包围坝头)开始,顺着丁坝挑流方向发展,沙垄出现在丁坝所在岸一侧,且高程沿水流方向逐渐增高,沙垄的迎水坡坡度小,背水坡坡度大,呈“流线型”,基本由粗砂组成,丁坝下游回流区有细砂淤积现象。



a) 工况M4



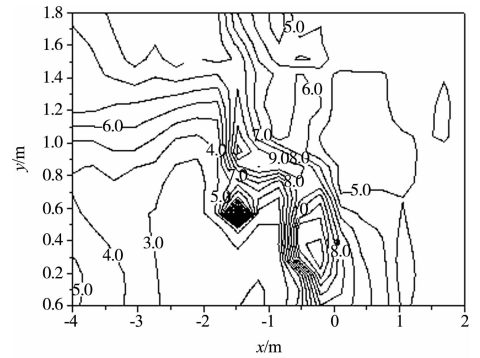
b) 工况M5

图8 冲刷地形照片

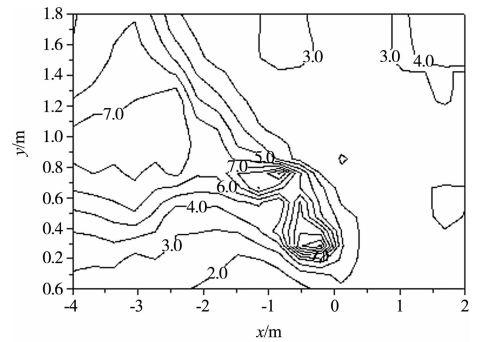
2.2 不同坝头形式丁坝对比

选取动床工况中的工况M4(50 cm正挑梯形断面圆弧直头)和工况M6(50 cm下挑梯形断面圆弧勾头)进行对比,绘制与冲刷关系密切的0.8 h水深水流紊动强度、紊动动能和最终冲刷地形等值线图,综合分析水流紊动强度和紊动动能与河床冲刷之间的关系(图9)。

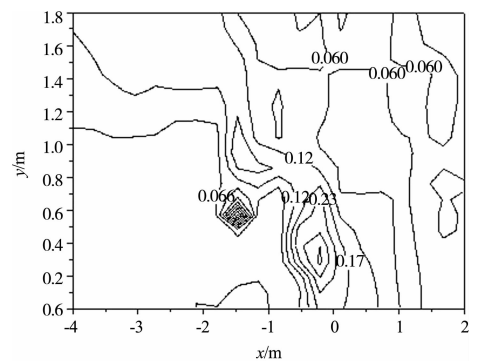
由等值线图可以看出,工况M6的紊动强度和紊动动能的等值线(图9b)、d))的分布大体上与工况4、工况5相同。对比冲刷地形等值线图(图9e)、f))可以看出,工况M6的冲刷坑的位置靠下,距离丁坝的距离较大,这在工况M6的最终冲刷地形(图10)中也有所体现。



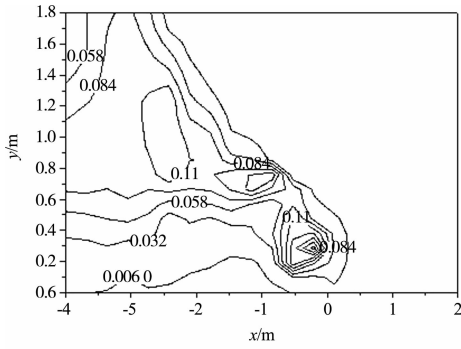
a) 工况M4紊动强度等值线



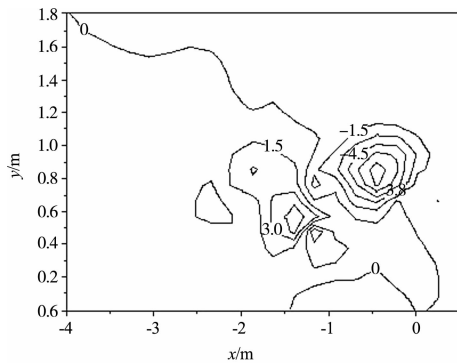
b) 工况M6紊动强度等值线



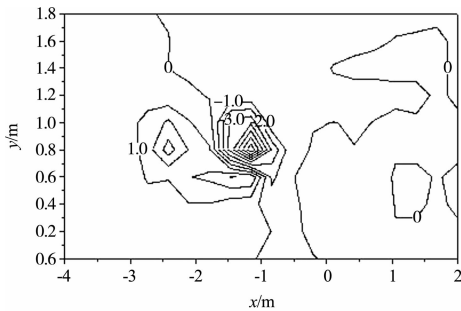
c) 工况M4紊动动能等值线



d) 工况M6紊动动能等值线



e) 工况M4冲刷地形等值线



f) 工况M6冲刷地形等值线

注：图中横轴0点为模型丁坝轴线所在位置。

图9 紊动强度、紊动能与冲刷地形对比

从紊动强度等值线图(图9a)、b))上可以看到, 工况 M6 坝轴线上的紊动强度 7.0 cm/s^2 , 工况 M4 坝轴线上的紊动强度 9.0 cm/s^2 , 对于丁坝周围区域, 工况 M6 的紊动强度值都要低于工况 M4。对比紊动动能等值线图(图9c)、d)), 工况 M6 丁坝周围的紊动动能值小于工况 M4 周围的紊动动能值, 而且分布范围要小于工况 M4。观察冲刷地形等值线图(图9e)、f)), 工况 M4 的最大冲刷深度为 4.5 cm , 沙垄的最大高度为 3.0 cm , 工况 M6 的最大冲刷深度 3.0 cm , 沙垄的最大高度为 1.0 cm 。



图10 工况 M6 冲刷地形

3 试验结果分析

3.1 丁坝周围水流紊动特性及冲刷过程分析

1) 从整体来看, 坝前水流流态较平顺, 水流结构稳定, 紊动强度和紊动动能的等值线比较分散, 数值较小, 床面被冲刷的程度轻微, 只有少量细颗粒泥沙被冲走, 对地形的变化影响不大。水流在进行途中受到丁坝的影响, 水流结构发生变化, 使水流从平顺状态转变成紊动状态, 坝头周围和丁坝挑流区紊动强度和紊动动能等值线密集, 数值增大, 紊动水流对坝体及河床产生强烈的作用, 导致坝头部位轻微破坏, 丁坝所在断面以下河床受到强烈冲刷, 形成冲刷坑。

2) 从冲刷坑地形的塑造方面分析, 当水流流经丁坝所在断面, 水流受到扰动形成紊动水流, 水流首先带走床面上的细砂成为悬移质, 一部分被冲到下游流失掉, 一部分被带到丁坝回流区, 形成冲刷地形照片中出现的细砂覆盖层。表层细砂被带走后, 表层粗砂继续受到紊动水流引起的床面附近流速和压力的脉动作用, 使粗砂起动成为推移质, 由于丁坝挑流使水流顶冲水槽边壁之后变向, 携带粗砂向左岸移动(这也是右岸没有沙垄的原因)形成沙垄最初形态。

随着冲刷坑深度的增大, 水流的紊动特性在此增强, 进而坑内的粗砂被带出坑外淤积, 使沙垄增高, 试验观察到沙垄基本上由粗砂组成。当冲刷坑扩展到一定范围之后, 紊动水流引起脉动力不足以使冲刷坑内的粗砂起动时, 冲刷坑的发展趋于稳定。在冲刷过程中, 细砂之所以能够抵抗自身的重力作用, 在垂线上保持一定的分布, 完全是因为水流紊动引起的上下水团交换的结果。

从试验结果中可以知道,沙垄的断面形状是“流线型”,这是水流的流体性质导致的。当丁坝坝头遭到破坏时,坝头的挑流作用减小,使丁坝紊动强度和紊动动能减小,冲刷坑内粗砂趋于稳定,上游的泥沙会有部分填充冲刷坑,使冲刷坑深度减小。

3.2 不同形式丁坝对比分析

1) 不同断面形式丁坝。

圆弧断面丁坝作用下的紊动特性等值线图属于“散布型”,分布范围大,同位置测点数值较小;梯形断面丁坝作用下的紊动特性等值线图属于“集簇型”,分布集中,同位置测点的数值较大。对应于两种坝型的紊动特性等值线图,从冲刷地形等值线上可以看出梯形断面丁坝作用下的冲刷坑深度较大,且冲刷坑紧靠丁坝下游,不利于保证丁坝稳定,圆弧型断面丁坝对翻坝水流的扰动较小,使水流紊动强度降低,冲刷坑深度小范围广,属于“宽浅型”,性能优于梯型断面丁坝。

2) 不同坝头形式丁坝。

从冲刷地形等值线图可以看出,勾头丁坝的挑流区域靠后,冲刷坑的深度不大,沙垄高度比较小,而且距丁坝较远;从结构来看,勾头坝头对于水流有平顺引流作用,水流行进过程中,坝头起到了部分顺坝的作用,使水流的突变性减少,水流紊动强度降低,这使得冲刷坑的深度和沙垄高度都较小(图10),而且冲刷坑的位置距离坝体稍远,对丁坝的整体稳定性影响较小,对于保证丁坝稳定性有利。

4 结论

1) 丁坝扰动行进水流,使水流紊动增强,引起床面附近流速和压力的脉动作用,使河床泥沙产生运动,导致坝头周围和丁坝下游河床的冲刷。紊动强度和紊动动能这两个指标可以间接从量的角度阐释水流紊动对地形冲刷的影响程度。

2) 坝头周围和丁坝下游河床的细砂在紊动水流的作用下成为悬移质,一部分被行进水流冲走,

一部分进入丁坝下游回流区,沉降形成细砂覆盖层。粗砂在紊动水流的作用下形成断面形状是“流线型”的沙垄,而且沙垄只出现在冲刷坑的左侧。

3) 丁坝坝头破坏后,坝头对水流的扰动作用减小,丁坝周围水流紊动强度降低,冲刷坑趋于稳定,上游来沙部分填充冲刷坑,使冲刷坑深度有减小的趋势,表现出了一定的自动修复功能。

4) 圆弧断面丁坝在减弱水流紊动,减轻河床冲刷方面优于梯型断面丁坝,勾头丁坝能够平顺引流,减少行进水流的突变性,使水流紊动特性降低,性能优于直头丁坝。

参考文献:

- [1] 王平义,程昌华,荣学文,等. 航道整治建筑物水毁理论及模拟技术[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 苏伟,王平义,喻涛,等. 不同结构形式丁坝水毁过程分析[J]. 水运工程,2012(4): 119-124.
- [3] Yu T, Wang P Y, Liu Q Y, et al. Study on the beach protection with the tetrahedron like penetrating frame groups[C]// Zhou Xuejun. Advances in Civil Engineering. Ji'nan: Trans Tech Publication, 2011: 2 533-2 536.
- [4] 应强,焦志斌. 丁坝水力学[M]. 北京:海洋出版社,2004.
- [5] Yu T, Wang P Y, Gao G Y. Turbulence kinetic and local scour around spur dike[C]//Zhou Baozhi. 2010 Conference on Modern Hydraulic Engineering. Xi'an: London Science Publishing Co., Ltd., 2010: 46-50.
- [6] Li H, Wang P Y, Su W. Study on the influence of river island on distribution of circulation in curve and branch channel [C]//Chen MI. International Conference on Advanced Mechanical Engineering. Wuhan: London Science Publishing Co., Ltd., 2012: 45-48.
- [7] 高桂景,王平义,杨成渝,等. 丁坝附近水流动能分布研究[J]. 水运工程,2007(11): 75-79.
- [8] 张华庆,曹艳敏,王建军,等. 丁坝紊动特性试验研究[J]. 水道港口,2007(11): 185-192.
- [9] 陈稚聪,黑鹏飞,丁翔. 丁坝回流区水流紊动强度试验[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008, 48(12): 2 053-2 056.
- [10] 张可,王平义,喻涛. 不同坝型丁坝坝体周围水流紊动特性试验研究[J]. 水运工程,2012(7): 1-7.